

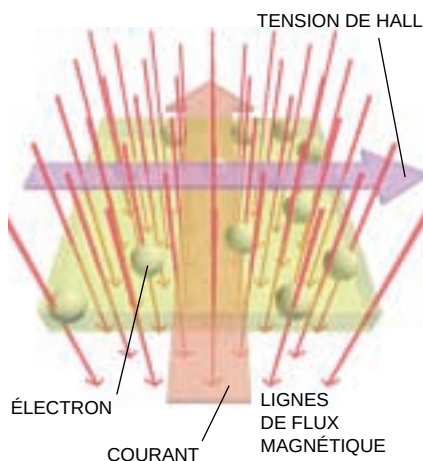
Lors de la découverte de l'effet Hall quantique, en 1980, les physiciens ont trouvé que les propriétés des électrons, dans ce nouvel état, étaient très différentes de celles de tous les autres états connus de la matière. Les dernières recherches dans ce domaine ont néanmoins révélé une relation entre l'effet Hall quantique et la supraconduction. Des études de cette relation ont même mené à la prédiction, confirmée par des expériences récentes, d'autres états de la matière jamais observés. Même si l'effet Hall quantique n'a pas d'application immédiate, son étude a stimulé la mise au point de concepts et d'outils théoriques nouveaux. Ces outils pourraient avoir de grandes répercussions en physique, de la même façon que la théorie de la supraconduction a fait progresser la physique des particules ou que l'étude des transitions de phase a permis de mieux comprendre l'Univers primordial. Enfin, les nouveaux principes pourraient être utiles en microélectronique, parce qu'ils permettraient de décrire les phénomènes dans des composants si petits, que les interactions entre les électrons devront être prises en compte.

La découverte de l'effet Hall quantique

L'effet Hall quantique est une manifestation inhabituelle d'un phénomène qui fut découvert par le physicien américain Edwin Hall au XIX^e siècle : lorsqu'une tension est appliquée entre les extrémités d'un fil conducteur, un cou-

rant y circule ; si le fil est dans un champ magnétique, les électrons en mouvement sont déviés latéralement, de sorte qu'ils s'accumulent d'un côté du fil.

Cette asymétrie produit une tension entre les deux bords du fil, perpendiculaire à la direction du courant. Pour la détecter, on relie les bords du fil à un voltmètre. L'intensité du courant étant fixée, la tension de Hall aug-

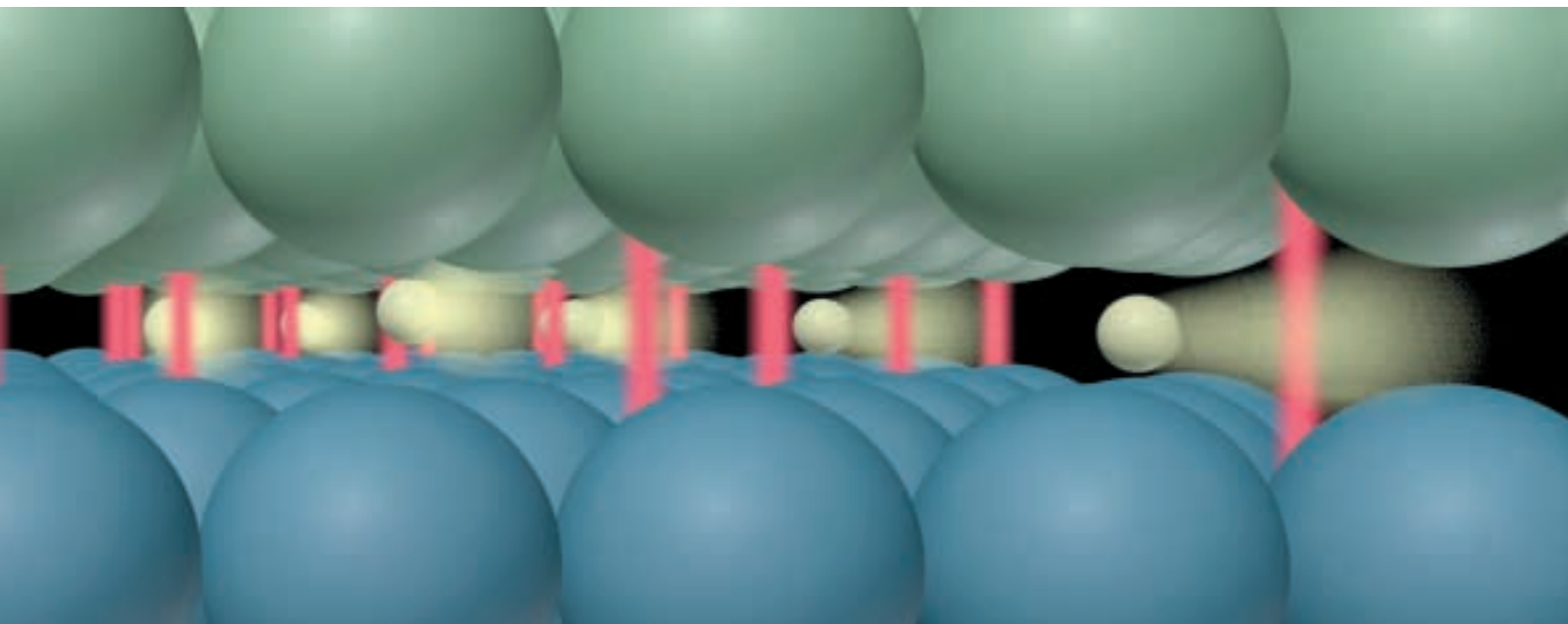


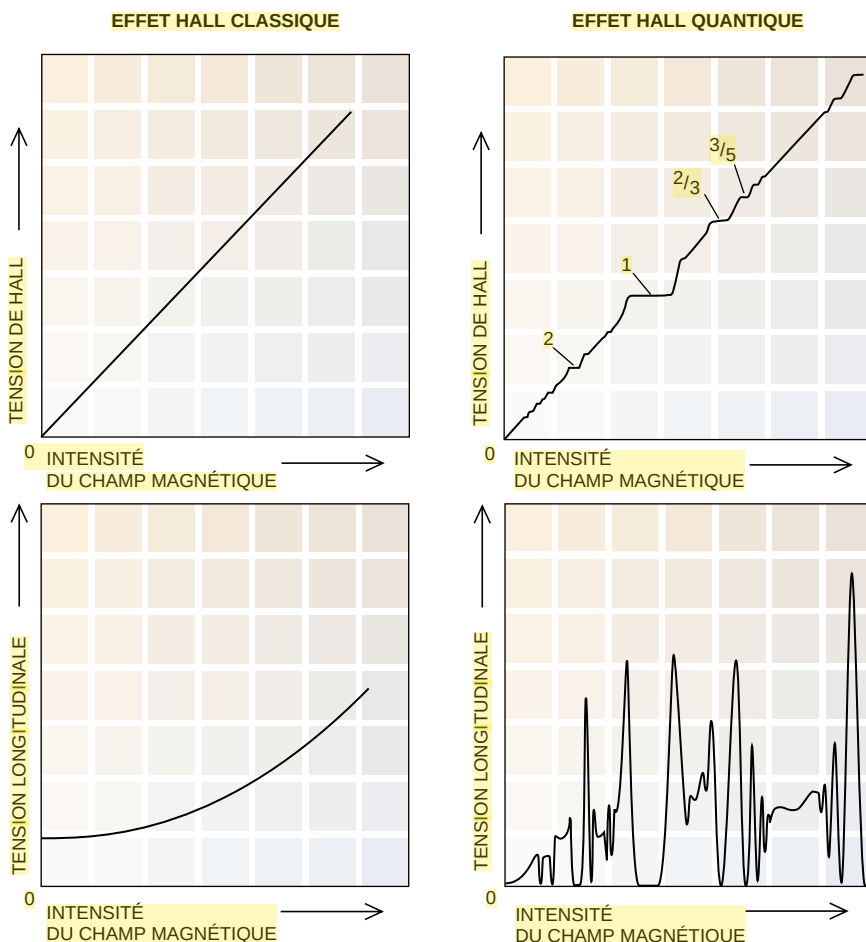
1. L'EFFET HALL QUANTIQUE se manifeste dans un plan entre deux semi-conducteurs refroidis à une température de quelques kelvins (ci-dessous) ; les atomes à la surface des semi-conducteurs sont représentés par des sphères vertes et bleues. Quand on applique un champ magnétique (lignes rouges), les électrons mobiles (petites sphères jaunes) se répartissent de façon à être plus nombreux d'un côté (à droite) que de l'autre. Cette redistribution des charges électriques engendre une différence de potentiel (la tension de Hall), perpendiculaire au courant (ci-dessus). L'effet Hall quantique correspond à une augmentation par paliers de la tension de Hall lorsque le champ magnétique croît.

mente régulièrement avec l'intensité du champ magnétique. Ce phénomène est l'effet Hall classique.

En 1980, Klaus von Klitzing et ses collègues du Laboratoire des champs magnétiques intenses de Grenoble découvrirent que, dans des circonstances particulières, l'effet Hall n'obéit plus aux règles classiques. Les progrès de la physique du solide avaient permis de confiner un ensemble d'électrons entre deux semi-conducteurs cristallins ; lorsque K. von Klitzing et ses collègues ont refroidi ces électrons à une température de un ou deux kelvins, ils ont observé que la tension de Hall n'augmentait pas régulièrement avec l'intensité du champ magnétique : elle augmentait par paliers, sa valeur ne variant pas dans de petits intervalles d'intensité du champ magnétique (voir la figure 2). De plus, la tension longitudinale – c'est-à-dire la tension dans le sens du courant – s'annulait presque lorsque la tension de Hall atteignait ces paliers. Autrement dit, les électrons sur le plan étaient devenus « parfaitement conducteurs » (ils ne sont pas supraconducteurs, car des électrons supraconducteurs expulsent un champ magnétique, ce que ne font pas ces électrons parfaitement conducteurs).

Plus étonnant encore, on a observé que la grandeur nommée conductance de Hall prenait une valeur particulière à chaque plateau. La conductance de Hall est le quotient de l'intensité du courant longitudinal par la tension de Hall (la conductance est l'inverse de la résistance). K. von Klitzing et





2. ON OBSERVE des manifestations de l'effet Hall quantique lorsque l'on compare certaines mesures avec celles qui se rapportent à l'effet Hall classique (non quantifié). Dans l'effet Hall classique, la tension transverse (tension de Hall) est proportionnelle au champ magnétique ; dans le cas quantique, la tension présente des plateaux pour des conductances égales à certains multiples entiers et fractionnaires d'une constante fondamentale (seuls quelques multiples ont été indiqués). Dans l'effet Hall classique, la tension longitudinale (parallèle au courant) varie régulièrement avec le champ magnétique, alors que, dans le cas quantique, elle s'annule lorsque apparaissent les plateaux de la tension de Hall.

ses collègues ont trouvé qu'à chaque plateau la conductance de Hall était un multiple entier du quantum de conductance e^2/h , où e est la charge de l'électron et h , la constante de Planck, qui relie la fréquence d'un rayon lumineux à la quantité d'énergie minimale qu'il peut transporter. Pour la découverte de cet «effet Hall quantique entier», K. von Klitzing obtint le prix Nobel de physique en 1985.

En 1982, aux Laboratoires Bell, Daniel Tsui, Horst Störmer et Arthur Gossard ont découvert que les plateaux de la tension de Hall étaient plus nombreux qu'on ne le pensait initialement : ils apparaissent non seulement pour des multiples entiers du quantum de conductance, mais aussi pour certains de ses multiples fractionnaires tels que $1/3$, $2/5$ et $3/7$, d'où le nom d'effet Hall quantique fractionnaire donné à ce phénomène.

Jusqu'à aujourd'hui, aucune expérience n'a montré de différences entre les conductances de Hall mesurées et les valeurs quantifiées. Elles sont égales entre elles avec une précision d'au moins un pour dix millions, et l'on a des indications indirectes qu'elles sont égales à un pour cent milliards. En raison de cette précision, l'Institut américain de normalisation a redéfini l'étalon de résistance comme le klitzing, qui est égal à h/e^2 , soit 25 012,8 ohms, et a choisi l'effet Hall quantique comme référence pour l'étalonnage des appareils de mesure de résistance.

Des remplissages magiques

Pourquoi la conductance de Hall prend-elle ces valeurs «magiques»? Les physiciens ont mis des années à comprendre que ces valeurs dépendent

de l'intensité du champ magnétique qui s'exerce sur chaque électron.

En mécanique quantique, la quantité de champ magnétique qui agit sur un échantillon est quantifiée : c'est un multiple d'un quantum de flux magnétique. On peut se représenter le quantum de flux comme une petite flèche. Pour mesurer l'intensité du champ magnétique, on compte le nombre de quanta de flux – le nombre de flèches – qui traverse la surface d'un échantillon.

Une autre grandeur liée à l'intensité du champ magnétique est le facteur de remplissage, que l'on définit comme le quotient du nombre d'électrons dans l'échantillon par le nombre de quanta de flux magnétique qui y pénètre. Lorsque le facteur de remplissage est égal à un, il y a un quantum de flux par électron ; lorsque le facteur de remplissage est égal à $1/3$, il y a trois quanta de flux pour chaque électron.

Il existe une correspondance entre les valeurs quantifiées de la conductance de Hall et les facteurs de remplissage, nommés facteurs de remplissage magiques : la conductance de Hall est égale au quantum de conductance (e^2/h) multiplié par le facteur de remplissage. Ainsi, lorsque le facteur de remplissage est égal à un, la conductance de Hall est égale à e^2/h ; lorsque le facteur de remplissage est égal à $1/3$, la conductance de Hall est égale à $(1/3) \times (e^2/h)$, et ainsi de suite.

Robert Laughlin, de l'Université de Stanford, est le premier à avoir expliqué l'existence des paliers de la conductance de Hall, en se fondant sur une description séparée des effets entier et fractionnaire. Conformément à la théorie quantique, il décrivait les électrons par des fonctions d'onde, c'est-à-dire des fonctions mathématiques qui indiquent l'état des particules.

Malgré son succès, l'approche de R. Laughlin envisageait des matériaux idéaux, bien différents des matériaux réels, toujours imparfaits. En outre, les fonctions d'onde, abstraites, ne donnaient pas d'explications intuitives des phénomènes. Son approche ne permettait pas de savoir s'il existait une relation entre l'effet Hall quantique et d'autres sortes d'activité électronique dans les solides. Enfin, il traitait différemment l'effet Hall quantique entier et l'effet Hall quantique fractionnaire, alors que ces effets se ressemblent.

En exploitant une analogie mathématique entre l'effet Hall quantique et